



MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

Ethel Caires de Oliveira

UFU - Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC - Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila 2121 – Campus Santa Mônica – Bloco 1M // 38400-902 - Uberlândia - MG.
ethelcaires2003@yahoo.com.br

Elias Bitencourt Teodoro, PhD

teodoro@mecanica.ufu.br

Resumo: *O conhecimento do coeficiente de absorção permite a melhor escolha de materiais acústicos usados como revestimentos de ambientes, ductos e silenciadores, para atenuar o ruído. Para medir o coeficiente de absorção acústica dos materiais, há três métodos experimentais diferentes: a Câmara Reverberante, o Tubo de Impedância e o Método “In Situ”. No primeiro caso, as amostras são submetidas à incidência de ondas em campo difuso; no segundo caso, a incidência é perpendicular e no terceiro caso, o ensaio é feito com o ângulo de incidência desejado. Este trabalho apresenta uma análise dos três métodos acima citados, destacando as vantagens e desvantagens de acordo com o objetivo de cada experimento.*

Palavras-chaves: *tubo de impedância, câmara reverberante, método in situ, absorção sonora*

1. INTRODUÇÃO

Nos projetos de adequação acústica de ambientes ou controle de ruído de locais específicos, a absorção é um dos fenômenos físicos do som que deve ser levado em conta, principalmente quando se pretende avaliar o tempo de reverberação do local. A grande dificuldade que o projetista encontra é conhecer, por exemplo, o coeficiente de absorção do material a ser empregado no projeto.

Para o controle de ruído no meio ambiente e tratamento acústico de recintos fechados, é fundamental dispor de elementos que absorvam energia sonora. A energia sonora emitida por uma fonte para um ambiente incide sobre um elemento absorvedor e reflete ao ambiente com uma intensidade de energia diminuída. O restante da energia é de alguma forma transformada pelo elemento, em energia térmica.

Os materiais considerados bons absorvedores acústicos são leves e possuem fibras ou poros, ou melhor, estruturas de espaços vazios, ou microcavidades que se comunicam entre si. A energia sonora se dissipa em calor por causa das perdas de escoamento viscoso dentro do material e também pelas perdas por atrito interno do movimento das fibras. Na manufatura dos materiais, controla-se a absorção pela seleção de espessura, densidade, porosidade, resistência ao fluxo de ar e orientação das fibras. Os materiais mais utilizados são fibras vegetais, minerais e cerâmicas ou espumas elastômeras. Com esses materiais, podem ser produzidas unidades pré-fabricadas, como painéis ou placas prontas para a instalação em superfícies de ambientes fechados.

Alternativamente, certos materiais podem ser borrifados ou espalhados diretamente sobre as estruturas. Alguns fatores não acústicos são também considerados importantes, como segurança, saúde e estética. Nesses casos, são adicionados aditivos antichama, revestimento de filmes plásticos ou tecidos, pinturas decorativas e placas metálicas perfuradas, entre outros. Toda a diversidade dos

materiais produzidos requer um controle em sua produção e instalação para assegurar as propriedades adequadas durante sua utilização.

Nos projetos, considera-se a dependência do fenômeno acústico em função da frequência na geração, na propagação, na audição e naturalmente assim dever ser na absorção. De fato, os materiais apresentam características diferentes de acordo com a frequência da onda sonora que neles incide.

A propriedade que descreve a absorção dos materiais para os especialistas é o coeficiente de absorção sonora α , cuja dependência na frequência (em bandas de oitava ou terços de oitava) é chamada curva de absorção sonora do material. Sua definição é a relação entre a energia sonora absorvida e a incidente. Um absorvedor ideal, por exemplo, tem $\alpha = 1$. O coeficiente de absorção sonora depende também do ângulo de incidência da onda.

Para aplicação de materiais em ambientes fechados, utilizam-se as curvas de absorção sonora para campo sonoro difuso, cujos valores são por alguns autores chamados de α Sabine. Um campo sonoro difuso é uma idealização na qual uma área no seu interior recebe energia sonora de todas as direções simultaneamente com igual probabilidade. Para medir o coeficiente de absorção sonora em campo difuso, utiliza-se um ambiente especial de laboratório chamado câmara reverberante. O método é bastante conhecido e está incluído na norma ISO 354 [1]. Outro método para medir a curva de absorção, é o método do tubo de impedância, nos quais obtêm-se resultados de absorção para incidência de ondas planas somente em direção perpendicular às amostras. As normas ISO 10534-1 [2] e ISO/FDIS 10534-2 [3] tratam dos procedimentos de ensaio nos tubos de impedância.

Existe ainda na literatura, um terceiro método para a medição das curvas de absorção dos materiais, designado por alguns autores por método da reflexão. As amostras são submetidas à incidência de ondas em campo livre a um determinado ângulo desejado. Para incidência perpendicular, os resultados são diretamente comparados aos obtidos nos tubos de impedância. O método da reflexão evoluiu com o desenvolvimento dos sistemas eletrônicos tornando viáveis medições fora do laboratório, ou *in situ*. A curva de absorção sonora é medida por intermédio de um dispositivo portátil que é levado ao objeto/local a ser ensaiado. Recentemente foi publicada a norma ISO 13472-1 que descreve a aplicação do método *in situ* para medição de absorção de superfícies de rodagem rodoviárias.

2. CÂMARA REVERBERANTE

Segundo a norma internacional ISO 354:1985, quando uma fonte sonora é colocada em operação em um ambiente fechado, o nível de pressão sonora em regime permanente, e o subsequente decaimento do som reverberante quando a fonte é interrompida, são governados pelas características de absorção sonora das superfícies limítrofes e dos objetos dentro desse espaço.

Em geral, a fração da potência incidente absorvida depende do ângulo de incidência. Para a redução de ruído por meio de um tratamento acústico com absorvedor, o conhecimento das características de absorção sonora das superfícies, normalmente na forma de uma média sobre todos os ângulos de incidência, é necessário. Assim pode-se estimar o tempo de reverberação de um auditório, escritório, fábrica, entre outros.

A distribuição de ondas sonoras em ambientes fechados típicos inclui uma larga e imprevisível faixa de ângulos, é conveniente, para propósitos de normatização, tomar uma distribuição uniforme como a condição básica.

Se, todavia, a intensidade sonora é independente da posição dentro da câmara, o campo sonoro é dito difuso, e os sons que atingem uma superfície da câmara estão em incidência aleatória.

Medições em câmaras reverberantes, são necessárias porque, dessa forma, os efeitos de montagens práticas podem ser considerados. Além disso, é a única maneira de se determinar a absorção sonora de objetos discretos tais como: cadeiras, quadros, poltronas.

A câmara reverberante, veja Figura 1, dever ter um volume de pelo menos 150 m^3 , medido com uma tolerância de 5%. Para novas construções, o volume deve ter pelo menos 200 m^3 , medido com a mesma tolerância de 5%.

É recomendado que a câmara atenda a seguinte condição: $L_{\text{máx}} < 1,9 V^{1/3}$, onde V é o seu volume e $L_{\text{máx}}$ é o comprimento da maior linha reta que se pode obter no interior da câmara.

Para se obter uma distribuição uniforme de frequências naturais, especialmente nas bandas de baixas frequências, a câmara não deve ter duas dimensões iguais ou múltiplas entre si.

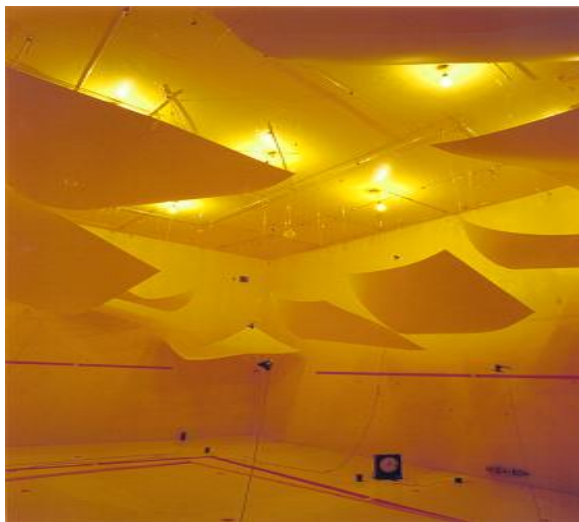


Figura 1: Câmara Reverberante (200 m^3). CCADET– Centro de Ciências Aplicadas e Desenvolvimento Tecnológico – México. Fonte: www.cinstrum.unam.mx (set/2005)

É recomendado que a amostra tenha forma retangular com uma relação entre comprimento e largura entre 0,7 e 1, ou seja, para uma câmara reverberante com volume entre 200 a 300 m^3 são necessárias amostras de área entre 10 a 12 m^2 para as medições. A amostra deve ser colocada afastada de no mínimo 1m das bordas das paredes da câmara. De preferência, é recomendado que as bordas da amostra não estejam paralelas à parede mais próxima.

No caso de amostras colocadas diretamente sobre uma superfície da câmara, as bordas devem ser totalmente cobertas por uma moldura de seção retangular, construída de materiais acusticamente refletoras e, em geral, de espessura inferior a 2 cm. A moldura não deve estender-se acima da amostra e não deve apresentar folgas em relação à superfície da câmara onde está montada.

No caso de amostras com espaçamento de ar, por exemplo, para simular um forro suspenso, devem ser construídas paredes laterais perpendiculares à superfície de ensaio. As paredes laterais devem fechar tanto o espaçamento de ar, quanto as bordas da amostra e devem ser altamente refletoras.

A instrumentação requerida pela ISO 354 inclui microfones de medição calibrados para campo difuso, fontes sonoras omnidirecionais e analisadores em bandas de frequência também calibrados.

As curvas de absorção são determinadas indiretamente de medidas de tempos de reverberação, comparando-se os da câmara vazia com os da câmara com 10 a 12 m^2 de amostras dispostas controladamente no piso. Cada condição da câmara, vazia ou com amostra, é representada por médias espaciais dos tempos de reverberação, de por exemplo 2 posições da fonte e 3 posições de microfones. O tempo total de medição requerido é alto, incluindo transporte de material ao laboratório.

3. TUBO DE IMPEDÂNCIA

Neste método, um alto falante colocado na extremidade de um tubo de seção transversal uniforme produz ondas acústicas. Na extremidade oposta é colocada a amostra a ser avaliada. Se o tubo tem como terminação, um refletor quase perfeito, as ondas estacionárias de pressão estabelecem, por interferência das ondas incidentes e refletidas, um padrão como mostrado na Figura 2-A.

Quando um material absorvente é colocado na extremidade do tubo, aparece uma variação na relação de fase entre as ondas incidentes e refletidas, causada pela impedância acústica do material, produzindo um padrão de onda estacionária como o mostrado na Figura 2-B (GERGES, 2000).

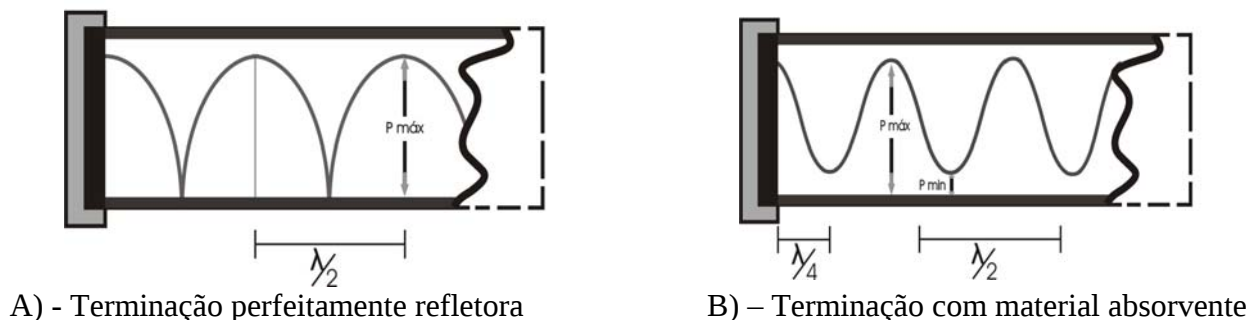


Figura 2: Representação esquemática do tubo e foto do protótipo construído.

O aparato de medida consiste de um tubo longo com um alto falante montado em uma das suas extremidades. Na extremidade oposta está o suporte de amostra e a amostra a ser testada. O altofalante emite uma onda sonora no interior do tubo que incide na amostra e reflete. A pressão máxima e mínima dentro do tubo pode ser detectada por um ou dois microfones, de acordo com a técnica adotada. Na Figura 3 apresentamos a representação esquemática de um tubo de impedância estudado por GIAMPAOLI, (1987).

Na primeira técnica citada anteriormente, utiliza-se apenas um microfone para diferentes posições selecionadas ao longo do tubo, cobrindo dessa forma, diferentes faixas de frequência. Já na segunda, os sinais dos dois microfones são simultaneamente processados pelo analisador digital e a curve de absorção é determinada.

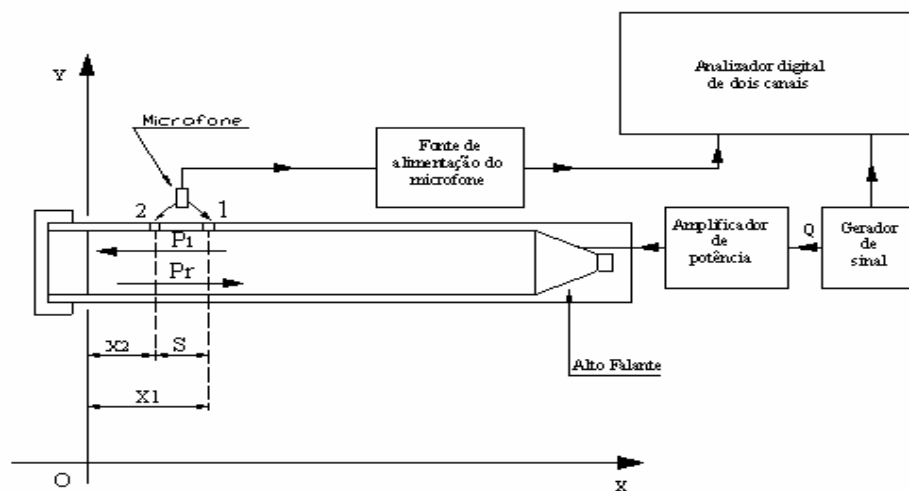


Figura 3: Exemplo ilustrativo do Tubo de Impedância com a técnica de um microfone.

É recomendável utilizar a técnica de um microfone, como forma de evitar qualquer erro sistemático de diferença de amplitude e de fase, ou outros possíveis erros, devido a possíveis diferenças entre os dois microfones, tornando desnecessário portanto, a aplicação de funções de correção. Eliminam-se assim, complicações computacionais adicionais (CHU, 1986).

Com a técnica de um microfone, dependendo do modelo, o microfone pode estar alojado num carrinho que pode mover-se para frente e para trás, sobre um trilho com escala graduada, ou pode ser encaixado ao longo do tubo, em orifícios pré-determinados.

Para estabelecer o coeficiente de absorção sonora de um dado material, o tubo deve ser usado em conjunto com um gerador de sinais, um filtro e um medidor de nível.

A escolha do material para a confecção do tubo não influi nos resultados, apenas o seu diâmetro e comprimento. Na Figura 4 apresentamos um tubo de impedância construído pelo LVA – Laboratório de Vibrações e Acústica da UFU/FEMEC.

Os resultados obtidos são utilizados mais para desenvolvimento de materiais, em amostras recortadas apropriadamente do elemento original para serem ajustadas nas seções transversais dos tubos.

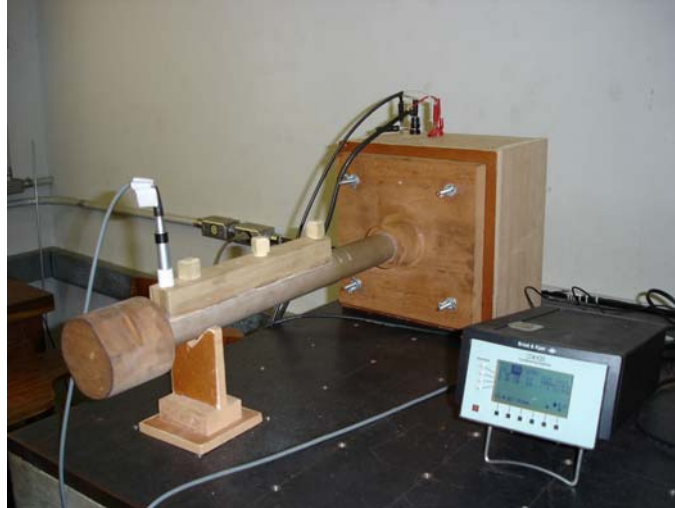


Figura 4: Tubo de Impedância construído pelo LVA – Laboratório de Vibrações e Acústica da UFU/FEMEC. Foto: Ethel Caires (agosto/2005).

4. MÉTODO *IN SITU*

O método *in situ* é executado configurando-se uma fonte sonora transiente direcionada para a superfície a ser ensaiada pelo ângulo de incidência desejado. Um microfone é colocado entre a fonte e a amostra para registro da forma de onda sonora. A Figura 5 mostra um esquema do método para incidência perpendicular à superfície da amostra, onde d_s é a distância entre a fonte e o microfone, d_m é a distância entre o microfone e a amostra.

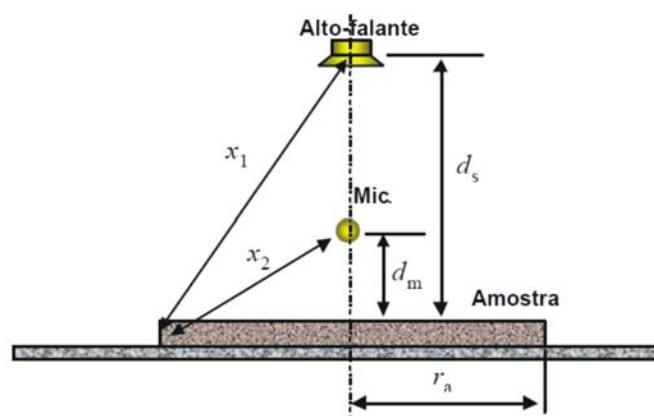


Figura 5: Representação esquemática dos elementos do método *in situ* para incidência normal à amostra

A onda incidente é gerada pela fonte e direcionada para a superfície sob teste. O microfone é posicionado entre a fonte e a superfície para captar tanto a onda incidente quanto a onda refletida pela superfície da amostra. Os campos incidente e refletido são separados e utilizados para o cálculo dos coeficientes de reflexão e posteriormente para os cálculos dos coeficientes de absorção.

Para separar os campos sonoros utiliza-se o comportamento transiente, ou impulsivo, do sistema de medição na seguinte seqüência:

- a) A frente de onda impulsiva gerada pela fonte atinge o microfone após a propagação entre os dois pontos;
- b) A propagação prossegue até a onda incidente atingir a superfície;
- c) A parcela da onda incidente não absorvida pela superfície retorna em direção ao microfone e a fonte;
- d) A frente de onda refletida percorre a distância de propagação entre a superfície e o microfone;
- e) O microfone capta a frente de onda refletida;
- f) A propagação da frente de onda prossegue na direção da fonte.

O sinal captado pelo microfone durante a duração do processo terá dois impulsos notáveis ocorrendo em tempos distintos. Com o sinal elétrico do microfone digitalizado e armazenado, os dois componentes são separados por meio de janelas em dois novos sinais. Aplicando-se operações de FFT - Fast Fourier Transform, nestes novos sinais, obtêm-se os espectros incidente e refletido.

O coeficiente de reflexão complexo será o produto da divisão do espectro refletido pelo incidente. Para o cálculo do coeficiente de absorção calcula-se a diferença entre o valor unitário e o quadrado do módulo do coeficiente de reflexão, como já é bem conhecido.

Para a realização dos ensaios *in situ* aplicando a técnica da subtração é necessário dispor de um dispositivo composto de um altofalante em uma caixa acústica, um microfone e um meio de fixação entre os dois. O altofalante pode ser um pequeno *woofer*, instalado em uma caixa acústica para reforçar a sua resposta nas frequências graves. A recepção dos componentes incidente e refletido é realizada pelo microfone. Como a curva de absorção é uma medida relativa, a resposta do microfone não precisa ser calibrada, e o microfone pode ser de baixo custo como os de eletreto. O meio de fixação deve manter o alinhamento e a posição relativa entre o altofalante e o microfone entre as duas medidas de respostas impulsivas necessárias à técnica da subtração.

O processamento de sinais, ou estimativa das respostas impulsivas, é realizado digitalmente. Assim, dispõem-se de um computador com conversores A/D - Analógico/Digital e D/A - Digital/Analógico e um amplificador para entrada e saída dos sinais. A Figura 6 ilustra esquematicamente o dispositivo completo de ensaio.

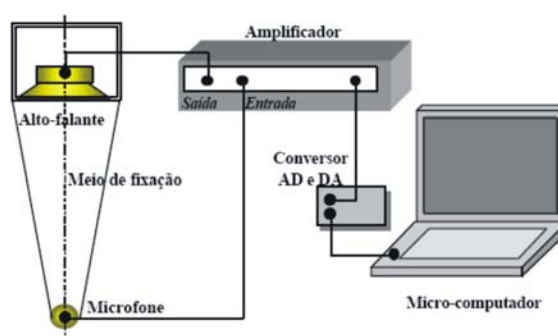


Figura 6: Dispositivo de medição do método *in situ*.

Para realizar o processamento envolvido na estimativa da absorção é necessário dispor de um programa de computador. A primeira etapa a ser cumprida é de medir respostas impulsivas por métodos indiretos tais como MLS - Maximum Length Sequence, ou varreduras de senos. Outra vez nesse caso, já existe uma ampla oferta de comercialização de programas para medições acústicas que dispõem das funções apropriadas. Nestes equipamentos geralmente estão incluídas rotinas de FFT - Fast Fourier Transform, janelas e operações com espectros complexos em frequência (MASSARANI,2002).

5. VANTAGENS E DESVANTAGENS

Como já mencionado na introdução, o método de campo difuso fornece resultados mais coerentes à aplicação da teoria de acústica de salas. Os fornecedores de materiais acusticamente absorventes podem apresentar as curvas de absorção como especificação técnica dos seus produtos. A recomendação de utilização do método no controle de produção envolve alguns aspectos. A principal limitação é devido aos altos custos: é necessário dispor de uma instalação de laboratório sofisticada, ou seja, uma câmara reverberante com um grande volume que deve ser qualificada pela instalação de elementos difusores. Além disso, os procedimentos de medição são complexos e demorados.

A outra opção tradicional é o uso dos métodos em tubo de impedância. Normalmente, esse método faz parte de um conjunto de instrumentação utilizado nos setores de desenvolvimento de produto, nos quais também são medidos: densidade, resistência ao fluxo de ar e porosidade por outros dispositivos. Além da curva de absorção os usuários dos tubos podem obter outras grandezas úteis na definição do material, principalmente as curvas de impedância acústica com suas naturezas complexas. A parte real da impedância acústica é relacionada às propriedades resistivas, ou de dissipação de energia, e a parte imaginária às propriedades reativas, relacionadas a mudanças de fase das ondas sonoras refletidas. Os resultados obtidos são mais precisos e de maior reprodutibilidade do que os de campo difuso, porém são restritos à incidência normal de ondas planas.

Os tubos são dispositivos de ensaio mais simples que as câmaras reverberantes. A maior desvantagem dos métodos em tubo de impedância está na preparação dos corpos de prova. O tamanho das amostras é limitado à dimensão da seção transversal dos tubos. A seção transversal de um tubo limita a frequência mais alta do ensaio. É comum a utilização de dois tubos, um de maior diâmetro para uma faixa de frequência mais baixa e outro de menor diâmetro para complementar as altas frequências. Em alguns casos a preparação dos corpos de prova pode descaracterizar o material, seja pela perda da agregação do material, pela restrição da forma às pequenas seções ou pelo ajuste ao tubo sem folgas nem compressão excessiva. No propósito de controle da produção é necessário retirar algumas placas estatisticamente representativas para serem transformadas nas amostras e obviamente inutilizadas.

O método *in situ* apresenta-se como uma alternativa viável especialmente para o propósito de controle de produção. Sua execução pode ser realizada em uma sala comum próximo a saída da linha dos produtos. O dispositivo de ensaio tem uma construção mais simples que a do tubo de impedância, envolvendo custos mais baixos.

Os resultados obtidos têm a mesma fundamentação dos relativos aos tubos de impedância, inclusive com a possibilidade de fornecer a impedância acústica. Não há a necessidade de preparação de corpos de prova, possibilitando a medição de até 100% da produção sem destruição do produto. Além disso, exige um tempo menor de procedimento.

A desvantagem do método *in situ* em relação aos outros dois considerados acima está na complexidade do processamento. Mais do que a complexidade, talvez seria a novidade da técnica de medição e da instrumentação necessária.

Entretanto, outros ensaios baseados em estimativa indireta de respostas impulsivas para medição de grandezas acústicas têm sido apresentados surgindo como uma nova tendência em expansão. A instrumentação também está cada dia mais acessível com o aumento da oferta de: placas de som, conversores digitais precisos, computadores pessoais e até mesmo *notebooks*. O controle da produção poderia ser realizado configurando-se o dispositivo de medição para ensaiar o produto no piso de um ambiente.

6. REFERÊNCIAS

- CHU, W. T., "Transfer function technique for impedance and absorption measurements in the impedance tube using a single microphone". Journal of Acoustical Society of America, New York, 80 (2): 555-60, Aug. 1986.
- GERGES, Samir N. Y. *Ruído Fundamentos e Controle*, Editora NR, 2ª Edição. Florianópolis, SC, Brasil, p. 313-315. 2000.
- GIAMPAOLI, Eduardo, "Características de absorção acústica de tijolos transformados em absorventes de ruídos de baixa frequência". Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica. Florianópolis, Julho de 1987.
- ISO 354, "Acoustics - Measurement of Sound Absorption in Reverberation Rooms." , 1985.
- ISO 10534-1, "Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 1: Method using standing wave ratio" , 1996.
- ISO/FDIS 10534-2, "Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method." , 1996.
- ISO 13472-1, "Acoustic – Measurement of Sound Absorption Properties of Road Surfaces in situ – Part 1: Extended Surface Method." , 2002.
- MASSARANI, P.M., Araújo, M.A.N., "Medição de Absorção Sonora pelo Método In Situ em Ambiente Reverberante.", *Anais do II SIBRAMA e XX SOBRAC*, Rio de Janeiro, 2002.

METHODS TO MEASURE THE ACOUSTIC ABSORPTION COEFFICIENT

Ethel Caires de Oliveira

UFU - Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC - Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila 2121 – Campus Santa Mônica – Bloco 1M // 38400-902 - Uberlândia - MG.
ethelcaires2003@yahoo.com.br

Elias Bitencourt Teodoro, PhD

teodoro@mecanica.ufu.br

Abstract: *The knowledge of the acoustic absorption permits a better choice of materials used as acoustic covering of buildings, ducts and silencing devices, to reduce noise. To measure the acoustic absorption coefficient of materials, there are three different experimental methods: Reverberation Room, Impedance Tube and the Method "In Situ". In the first one, the samples are submitted to the incidence of waves in diffuse field; in the second case, the incidence is perpendicular, and in the third case, test is made using the desired incidence angle. This work presents an analysis of the three mentioned methods, emphasizing their advantages and disadvantages, according to the objective of each experiment.*

Keywords: impedance tube, reverberation room, method in situ, acoustic absorption.